经验交流

港珠澳大桥桥梁混凝土结构附加防腐蚀措施设计研究

汤雁冰 陈 龙 王胜年 范志宏
中交四航工程研究院有限公司 水工构造物耐久性技术交通行业重点实验室 广州 510240

摘要：首先对港珠澳大桥桥梁主体混凝土构件的腐蚀风险进行评估，确定大桥需要采取附加防腐措施的构件，然后对不同附加防腐措施的技术特点和保护效果进行研究，并加以明确圈定附加防腐措施的选取范围，在其基础上对可选的附加防腐措施的全寿命成本进行比较分析，最终确定港珠澳大桥主体混凝土结构技术可靠、经济效益最优的附加防腐措施。突破现有附加防腐措施设计仅依靠规范进行人为选择的不足，发展了混凝土结构附加防腐蚀措施的设计方法。

关键词：港珠澳大桥 腐蚀风险 保护效果 全寿命成本
中图分类号：TG172 **文献标识码**：A **文章编号**：1002-6495(2016)04-0384-07

1 前言

港珠澳大桥是连接香港特别行政区、广东省珠海市、澳门特别行政区的大型跨海通道，大桥跨越珠江口伶仃洋海域，是国家高速公路网规划中珠江三角洲地区环线的组成部分和跨越伶仃洋海域的关键性工程[1]。大桥位于亚热带海域，具有气温高、湿度大、海水含盐度高的特点，受海水、海风、盐雾、潮汐、干湿循环等众多因素影响。根据相似环境下的暴露试验和工程调查研究结果，钢筋混凝土结构腐蚀严重，耐久性问题突出[2,3]。为了保证大桥120 a的耐久性设计使用寿命要求，除了提高混凝土自身的质量外，采用附加防腐措施是提高大桥耐久性寿命的最重要技术手段。

目前，对混凝土结构的附加防腐蚀措施的设计均是按照规范，人为地凭借经验去选取，一方面，造成人为的影响因素较大；另一方面，造成采取的附加防腐措施不够合理，施加的措施过多或过少，造成经济上的浪费。本文针对当前混凝土结构附加防腐蚀措施设计上的不足，首先对大桥桥梁混凝土构件的腐蚀风险进行评估，确定不同构件的腐蚀风险的大小，明确需要采取附加防腐措施的构件；然后对不同附加防腐措施的技术特点、防护效果进行分析研究，选择技术上可靠、能够满足防护年限要求的附加防腐措施；最后对技术上可靠的附加防腐措施进行全寿命成本分析，优选出技术可靠、经济效益最佳的附加防腐措施。

2 腐蚀环境划分

不同的腐蚀环境下(大气区、浪溅区、水变区和水下区)，混凝土结构面临的腐蚀风险不同，在进行附加防腐措施设计前，首先必须明确不同混凝土构件所处的腐蚀环境，以便针对不同腐蚀环境下的混凝土构件采取科学、合理的附加防腐蚀措施。港珠澳大桥桥梁混凝土结构的腐蚀环境可按照无掩护条件下的天文潮划分[4]。表1给出了港珠澳大桥桥梁主要混凝土构件的腐蚀环境划分。

3 腐蚀风险评估

明确不同腐蚀环境下混凝土结构的腐蚀风险大小是采取附加防腐措施的前提，根据不同构件腐蚀风险的大小不同，选择要不要采取附加防腐措施或采取何种防腐措施。

混凝土结构物的腐蚀风险主要有两方面因素决定：一方面是结构物自身的抗腐蚀能力；另一方面是环境对结构物的侵蚀作用。结构物自身的抗腐蚀能力可用耐久指数(T_p)进行表示，环境对结构物的侵蚀作用可用环境指数(S_p)来表示，通过比较T_p和S_p来评价结构物的腐蚀风险[5]。

3.1 耐久指数

T_p是通过综合分析影响珠澳大桥混凝土结构耐久性多方面因素(如设计、混凝土原材料、施工等)，通过计算后获得的。T_p可用下式进行计算[5]：

定稿日期：2015-09-07
作者简介：汤雁冰，男，1982年生，博士，高级工程师
通讯作者：汤雁冰，E-mail: 120525229@qq.com，研究方向为海洋工程和装备的腐蚀与防护及腐蚀监测
DOI: 10.11903/1002.6495.2015.270

表1 港珠澳大桥混凝土构件的环境划分

结构物	构件	所在标高	所处环境
航通桥 (包括九州航通桥	主塔塔身	+4.8 m~+6.26 m	浪溅区
以及江海直达船航道桥)		+6.26~+18.8 m	大气区
	辅助墩墩身	+5.8 m~+6.26 m	浪溅区
		+6.26 以上	大气区
	边墩墩身	+3.8 m~+6.26 m	浪溅区
		+6.26 以上	大气区
	主塔承台及塔座	−1.2 m~−0.4 m	水变区
		−0.4 m~+4.8 m	浪溅区
	辅助墩承台及底座	−0.7 m~−0.4 m	水变区
		−0.4 m~+5.8 m	浪溅区
	边墩承台	−0.2 m~+3.8 m	浪溅区
青州航道桥	主塔塔身	+7.8 m 以上	大气区
	辅助墩墩身	+6.3 m 以上	大气区
	边墩墩身	+6.3 m 以上	大气区
	主塔承台及塔座	−2.1 m~−2.2 m	水下区
		−2.1 m~−0.4 m	浪溅区
		−0.4 m~+7.8 m	大气区
	辅助墩承台及底座	−0.8 m~+6.3 m	浪溅区
	边墩承台及底座	−0.8 m~+6.3 m	浪溅区
非通航孔桥	预制墩身	−2.1 m 以下	水下区
(岛桥结合部除外)		−2.1 m~−0.4 m	水变区
		−0.4 m~+6.26 m	浪溅区
		+6.26 m 以上	大气区
东人工岛结合	承台	+0.08 m~+2.58 m	浪溅区
部非通航孔	主车道墩身	+2.58 m~+6.26 m	浪溅区
		+6.26 m 以上	大气区
	主车道箱梁(A10-A7)	+4.5 m~+6.26 m	浪溅区
		+6.26 m~+7.4 m	大气区
	主车道箱梁(A1-A7)	+7.4 m 以上	大气区
	主车道桥台	+0.5 m~+4.503 m	浪溅区
西人工岛结合部非通航孔	主车道桥墩	−3.5 m~−2.1 m	水下区
桥 (初始方案1)		−2.1 m~+0.4 m	水变区
		−0.4 m~+6.26 m	浪溅区
		+6.26 m 以上	大气区
	主车道12-14号墩箱梁	+4.07 m~+6.26 m	浪溅区
		+6.26 m~+9.25 m	大气区
	主车道14-23号墩箱梁	+6.75 m 以上	大气区

$$T_p = 50 + \Sigma T_p(I, J) \quad (1)$$

式中，$T_p(I, J)$ 表示对大桥桥梁混凝土结构的耐久性有影响的耐久指数特征值，耐久指数特征值的组成及取值范围见表2。

3.2 环境指数

S_p是由结构所处的环境条件及所要求的免维修期而定，S_p可按下式进行计算[6]：

$$S_p = S_0 + \Sigma(\Delta S_p) \tag{2}$$

式中，S_0表示标准环境下的环境指数特征值，ΔS_p表示高盐分等恶劣环境条件下环境指数增量。

在标准环境下，免维修期在10~15 a之间，环境指数特征值S_0等于0；免维修期为50 a，环境指数特征值S_0为100；免维修期为100 a，环境指数特征值S_0为150。根据免维修期的时间不同，环境指数特征值S_0可相应增减[5]。

港珠澳大桥120 a的使用寿命，采取线性外推的方法得出环境指数特征值S_0为170[6]。

ΔS_p根据构件所处的环境而定。港珠澳大桥处于亚热带海洋环境，不存在冻融的影响。因此港珠澳大桥的环境指数增量ΔS_p数值为10~70，环境越严酷，环境指数增量越大。对港珠澳大桥来说，水变区和浪溅区基本上分布在同一混凝土构件上，水变区的环境指数按浪溅区来处理，浪溅区和水变区的环境指数增量ΔS_p取70，大气区的环境指数增量取40；水下区的环境指数增量取10。不同腐蚀环境环境指数增量见表3。

3.3 大桥不同腐蚀环境构件腐蚀风险评估

在进行耐久性设计时，对结构的各个部分，必须保证耐久指数(T_p)大于或等于环境指数(S_p)，即$T_p \geq S_p$[5]。

当所有混凝土构件都满足$T_p \geq S_p$时，混凝土结构工程不经维修即可达到设计使用年限的要求，差值越大，腐蚀风险越低。

当部分混凝土构件不满足$T_p \geq S_p$，即$T_p < S_p$时，混凝土结构工程不经维修达不到设计使用年限的要求。

表2 耐久指数特征值的组成及取值范围[5]

I	J	栏目	$T_p(I, J)$
1	1	设计人员	6~-2
(受力钢筋的种类、	2	结构的形状、尺寸	根据$T_p(4, 1)$进行考虑
钢筋的详细设计、	3	保护层	30~-30
施工图)	5	主筋的排数和净间隙	15~-35
	6	构造钢筋	10~0
	7	施工缝	0~-25
	8	施工图	0~-35
2	1	温度及收缩裂缝	10~-20
(设计裂缝)	2	荷载裂缝	30~0
3	1	水泥	10~0
(混凝土材料)	2	骨料的质量	8~-10
	3	掺合料与外加剂	0~-5
4	1	自充填性	35~-30
(混凝土)	2	密实性	20~-15
	3	单位体积混凝土的用水量	10~-25
	4	氯盐含量	5~-30
	5	混凝土生产的管理状况	18~-10
5	1	施工人员	25~-10
(混凝土施工)	2	混凝土运输、浇注、振捣密实	5~-5
	3	混凝土表面处理、混凝土养护	20~-45
6	1	钢筋加工	5~0
(钢筋施工、	2	钢筋架立	10~-20
模板施工、	3	模板施工	10~-15
支撑系统施工)	4	支撑系统施工	5~-5

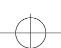


表4给出了不同腐蚀环境下不同混凝土构件的腐蚀风险大小，可见：港珠澳大桥所有的主体混凝土结构均满足 T_p-S_p大于零，大桥可满足120年免维修的耐久性设计使用寿命要求，其中，处于水下区的混凝土构件 T_p-S_p的值较大，达到50以上，腐蚀风险较小；而处于大气区、浪溅区和水变区的混凝土构件的 T_p-S_p的值虽大于零，但均较小，尤其是处于浪溅区和水变区的混凝土构件。

4 耐久性安全储备及防腐措施的技术特点与防护效果

4.1 耐久性安全储备

根据腐蚀风险评估的结果，不用采取附加任何防腐措施，仅依靠高质量的混凝土和足够的保护层即可满足120 a的耐久性设计使用寿命要求。但是，腐蚀风险评估是基于理想的设计和施工状态下，没有考虑实际施工过程中的不确定因素 (如原材料波动和施工质量偏差等) 以及各种实体结构受到多种因素耦合作用。为确保大桥120 a耐久性设计使用寿命，针对构件的重要性、维护的难易程度以及暴露部位所处的环境，采用一些有效的附加防腐蚀措施，使其具有一定的耐久性安全储备。

根据不同腐蚀环境的环境指数的大小及其腐蚀风险的大小，考虑到后期会对港珠澳大桥的耐久性状况进行跟踪调查和进行耐久性再设计以及经济成本问题，在此，提出不同腐蚀环境混凝土构件的耐久性安全储备要求：因水下区的混凝土构件的 T_p-S_p较大，已有足够的安全储备，可不考虑采取附加措施提高耐久性安全储备；大气区的混凝土构件，其腐蚀风险和环境指数均要小于位于水变区和浪溅区的混凝土构件，考虑增加约20 a耐久性安全储备；水变区和浪溅区基本分布于同一混凝土构件上，处于水变区的混凝土构件的耐久性安全储备可按腐蚀更为严酷的浪溅区来考虑，水变区和浪溅区的混凝土构件可考虑增加40 a以上的耐久性安全储备。表5给出了位于不同腐蚀环境的混凝土构件的耐久性安全储备要求。

表3 不同腐蚀区域的环境指数增量

腐蚀环境	环境指数增量 / ΔS_p
浪溅区/水变区	70
大气区	40
水下区	10

表4 腐蚀风险评估结果

腐蚀环境	构件	T_p	S_p	T_p-S_p
浪溅区/水变区	主塔	245.0	240	5.0
	墩身	242.4		2.4
	承台	245.0		5.0
	箱梁	240.8		0.8
	桥台	245.0		5.0
大气区	主塔	222.5	210	12.5
	墩身	219.8		9.8
	箱梁	211.3		1.3
水下区	墩身	231.2	180	51.2

表5 耐久性安全储备

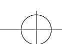
腐蚀环境	耐久性安全储备 / a
浪溅区/水变区	40以上
大气区	约20
水下区	已有足够耐久性安全储备

4.2 附加防腐措施技术特点

混凝土结构附加防腐蚀措施有很多，现行的混凝土结构防腐蚀技术规范将涂层、硅烷、环氧涂层钢筋、阻锈剂、透水模板和外加电流阴极保护作为主要的附加防腐措施予以规定[7,8]。不锈钢钢筋具有良好的防护效果，可以显著地提高钢筋发生点蚀的临界氯离子浓度[9]，在国外的许多使用寿命较长的重大工程中得以应用[10]，但在国内尚未得到大规模应用，港珠澳大桥设计使用寿命达120 a，是一座有重要影响力的超级工程。因此，在考虑港珠澳大桥桥梁混凝土结构可选用的附加防腐措施时，将不锈钢钢筋作为一种重要的附加防腐措施加以考虑。表6给出了上面所述几种防腐措施的防腐原理和技术特点。

4.3 保护效果

混凝土结构附加防腐措施的保护效果是进行混凝土结构耐久性设计时选择附加防腐措施的关键。目前，对不同附加防腐措施的保护效果还缺乏准确的定量研究结果，这里根据实体工程调查、暴露实验和室内快速实验的结果[9,11-17]，并结合相关的资料调研[18]，半定量的给出当前技术条件下，不同附加防腐措施的保护效果，如表7所示。这里需要说明的是，阻锈剂作为一种有效的防腐措施在许多工程中得以应用，但是，阻锈剂的主要作用是提高钢筋的点蚀临界氯离子浓度，港珠澳大桥桥梁混凝土结构耐久性设计使用寿命为120 a，钢筋发生点蚀发生在100 a之后，此时，掺到混凝土中的阻锈剂的成分和含量是否能维持稳定很难保证，因此，对港珠澳大桥桥梁混凝土结构，从技术角度来说，不建议采用阻锈剂作为



附加防腐措施。

4.4 附加防腐蚀措施初选

根据港珠澳大桥桥梁混凝土结构的耐久性安全储备要求，结合不同附加防腐措施的技术特点和保护效果分析结果，初步选定了不同腐蚀环境下桥梁混凝土结构可采取的附加防腐措施，如表8所示，可满足桥梁浪溅区和水位变动区混凝土结构耐久性安全储备不小于40 a，大气区混凝土结构的耐久性安全储备接近20 a。

5 防腐措施的全寿命成本分析

5.1 全寿命成本分析

全寿命成本分析是在保证工程设计使用寿命的前提下，使综合成本最少，实现技术可靠、经济合理。在进行全寿命成本分析时，由于各成本发生的时间年限不同，货币具有时间价值，为便于比较，采用“费用现值法”或“年费用法”将未来成本折算成现在成本进行比较分析[19]。项目全寿命计算周期相同时，宜采用现值法，也可采用年费用法；项目全寿命计算周期不同的方案，宜采用年费用法[19]。本论文中，各腐蚀环境中的计算期相同，故采用“费用现值法”进行不同附加防腐措施的全寿命成本比较分析。费用现值法的计算公式可表示为：

$$\mathrm{PC}=\sum_{t=1}^{n}(I+C-S_v)_t(P/F,i,n) \tag{3}$$

$$(P/F,i,n)=\frac{1}{(1+i)^n} \tag{4}$$

表7 不同附加防腐措施可延长混凝土结构的寿命

序号	防腐措施	延长混凝土结构的耐久性年限
1	涂层[11-14]	15~20 a
2	硅烷浸渍[13, 15]	15~20 a
3	不锈钢钢筋[9, 18]	寿命提高10倍
4	环氧涂层钢筋[18]	15 a
5	阴极保护	设计使用寿命
6	阻锈剂	---
7	透水模板[16, 17]	5~10 a

表6 混凝土结构常用的附加防腐蚀措施的技术特点

防腐措施	防腐原理	优点	缺点
硅烷浸渍	渗入混凝土毛细孔中，使毛细孔壁憎水化，使水分和所携带的氯化物难以渗入	施工方便，防腐蚀效果好；不改变混凝土外观且有表面自清洁功能；达到使用年限后重涂容易	不能在潮湿混凝土表面施涂
涂层	混凝土表层形成隔绝层	施工简便，保护效果显著；可根据需要改变混凝土外观	在潮湿表面施涂效果差；因耐候性原因后期易粉化、脱落而影响外观；达到使用年限后重涂施工困难。
不锈钢钢筋	在钢筋中添加一定量的耐蚀元素(Cr、Ni、Mo等)提高钢筋的点蚀临界氯离子浓度	施工简便，可显著提高钢筋的点蚀临界氯离子浓度	价格昂贵
环氧树脂钢筋	利用环氧树脂高化学稳定性，隔绝基体与外界环境	能有效隔绝各种腐蚀侵害	降低钢筋与混凝土之间的握裹力；施工过程控制涂层不损坏技术要求高；对涂层缺陷敏感，一旦锈蚀发生，无法补救。
阴极保护	使钢筋电位极化至阳极反应(即钢筋腐蚀反应)停止的电位	保护效果最好；保护时间长，保护年限可达50年以上	成本较高，施工技术及后期维护要求高
阻锈剂	在钢筋表面形成一层保护膜，抑制、阻止、延缓了钢筋腐蚀的电化学过程	可提高引起钢筋锈蚀的氯离子临界浓度，延缓钢筋脱钝发生的时间	长期防护效果不确定；易对混凝土性能造成不良影响
透水模板	具有透水、透气和保水的功能，能降低混凝土表层水灰比而达到提高表面质量的效果	提高表层混凝土密实度，改善混凝土表面质量和外观；对提高抗氯离子渗透性有辅助作用	增加混凝土施工成本，每平方20元左右

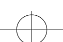


表8 不同腐蚀环境的附加防腐蚀措施初选

腐蚀环境	可采用的防腐措施
浪溅区/水变区	环氧涂层钢筋+两次硅烷浸渍
	外层不锈钢钢筋
	透水模版板 + 一次硅烷浸渍+预设电连接后期外加电流阴极保护
大气区	一次硅烷浸渍
	一次混凝土表面涂层

表9 不同腐蚀环境采取的附加防腐措施全寿命成本分析结果

腐蚀环境	可采用的防腐措施	全寿命成本
浪溅区/水变区	透水模板+两次硅烷浸渍+后期通电阴极保护	169.96
	环氧涂层钢筋+两次硅烷浸渍	949.07
	外层不锈钢钢筋	4457.5
大气区	一次硅烷浸渍	102.21
	一次混凝土表面涂层	103.93

式中，PC为费用现值，I为全部投资（包括建设投资和流动资金），C为营运期费用，S_v为计算期末回收的固定资产余值，t为年份，n为计算期(a)，i为折现率，取7%[4]。

初选的附加防腐蚀措施的全寿命成本计算结果如表9所示，浪溅区/水变区的混凝土构件采用"透水模板+两次硅烷浸渍+后期通电阴极保护"的费用成本最低，"环氧涂层钢筋+两次硅烷浸渍"次之，不锈钢钢筋最贵；大气区的混凝土构件采用涂层和硅烷浸渍的费用成本分别为103.93和102.21元/m^2，全寿命成本相近。

5.2 港珠澳大桥附加防腐蚀措施

通过对不同附加防腐措施的技术特点、经济效益和混凝土构件腐蚀风险三者之间综合分析，最终提出港珠澳大桥混凝土结构的附加防腐蚀措施设计建议，具体建议如下：

(1) 桥梁大气区混凝土结构采用硅烷浸渍防腐蚀措施从腐蚀风险（耐久性安全储备）和全寿命成本角度，大气区的混凝土结构采用涂层和硅烷均可，但是涂层本身及后期的颜色退化会影响大桥外观，且涂层后期维护和重涂困难，而硅烷浸渍不仅不改变混凝土外观，且有憎水自清洁功能，后期维护和重涂容易。因此，建议大气区的混凝土结构采用一次硅烷浸渍的外加防腐措施；

(2) 桥梁浪溅区/水位变动区混凝土结构采用外层不锈钢钢筋或环氧涂层钢筋加硅烷浸渍联合的外加防腐蚀措施

透水模板、硅烷浸渍与后期通电阴极保护联合的外加防护措施全成本最低。但在全长22.179 km的海上分散的桥墩阴极保护实施难度大，后期维护困难；而不锈钢钢筋和环氧涂层钢筋虽然全寿命成本高，但却是相对较保险的措施。因此，经全寿命成本、技术可靠性和腐蚀风险三方面综合分析，建议桥梁浪溅区/水变区的混凝土构件采用外层不锈钢钢筋或环氧涂层钢筋加硅烷浸渍联合的附加防腐蚀措施。

不锈钢钢筋施工简单，可以实现永久性的防腐，环氧涂层钢筋成本相对较低，但涂层一旦破坏，不仅不会起到保护作用，反而会促进钢筋的腐蚀，环氧涂层钢筋对施工控制要求高。鉴于港珠澳大桥桥梁浪溅区/水变区的混凝土构件的施工既有工厂预制，也有现场浇筑。混凝土现浇构件因是外海施工，质量控制起来相对较难，结构出现缺陷的几率大，发生腐蚀的风险比预制构件要大；预制构件采用工厂标准化施工，混凝土质量控制起来相对容易，且采用工厂标准化施工可实现对环氧涂层钢筋的施工过程的严格控制，有效降低因施工造成环氧树脂涂层的破损。因此，从技术可靠性、腐蚀风险和全寿命成本等各方面综合考虑，建议浪溅区/水位变动区的现浇混凝土构件附加防腐蚀措施设计采用外层不锈钢钢筋的附加防腐措施，浪溅区/水位变动区的预制混凝土构件附加防腐蚀措施设计采用环氧涂层钢筋加硅烷浸渍（两次）联合的附加防腐措施。

6 结论

(1) 腐蚀风险评估结果可知，只要从设计、混凝土的原材料、混凝土和施工这四个方面严格控制，仅依靠混凝土自身和足够的保护层厚度即可满足港珠澳大桥桥梁混凝土结构120 a使用寿命要求。

(2) 位于水下区的混凝土结构的腐蚀风险最小，

可不必采用附加防腐措施；而位于大气区、浪溅区和水变区的腐蚀风险较大，因施工过程中的一些不确定因素，需采用附加防腐措施以提高混凝土结构的耐久性。

(3) 通过对不同附加防腐措施的技术特点、经济效益和混凝土构件腐蚀风险三者综合分析，建议桥梁大气区混凝土构件附加防腐蚀措施设计采用一次硅烷浸渍附加防腐蚀措施，浪溅区/水变区混凝土构件附加防腐蚀措施设计采用外层不锈钢钢筋或环氧涂层钢筋加硅烷浸渍联合的防腐措施。

参考文献

[1] 汤雁冰, 王胜年. 混凝土耐久性监测传感器的研制及应用 [J]. 水运工程, 2015, (3): 99

[2] 潘德强, 洪定海, 邓恩惠等. 华南海港钢筋混凝土码头锈蚀破坏调查报告 [R]. 广州: 中交四航工程研究院有限公司, 1982

[3] 王胜年, 黄君哲, 张举连等. 华南海港码头混凝土腐蚀情况的调查与结构耐久性分析 [J]. 水运工程, 2000, (6): 8

[4] 陈龙, 汤雁冰. 基于全寿命理论的钢筋混凝土结构防腐蚀技术 [R]. 广州: 中交四航工程研究院有限公司, 2015

[5] 日本土木学会编, 向上译. 混凝土结构耐久性设计指南及算例 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010

[6] Tang Y B, Chen L, Wang S N, et al. Evaluation of the corrosion risk on the reinforced concrete bridge piers of the hongkong-zhuhai-macao bridge [J]. Appl. Mech. Mater., 2013, 256-259: 1075

[7] JTJ275-2000. 海港工程混凝土结构防腐蚀技术规范 [S]. 2001

[8] JTGT B07-01-2006. 公路工程混凝土结构防腐蚀技术规范 [S]. 2006

[9] 陈龙, 瞿彧, 汤雁冰等. 不锈钢钢筋的临界氯离子浓度 [J]. 腐蚀与防护, 2014, 35(5): 446

[10] 张国学, 吴苗苗. 不锈钢钢筋混凝土的应用及发展 [J]. 佛山科学技术学院学报 (自然科学版), 2006, 24(2): 10

[11] 汤雁冰. 海洋工程钢筋混凝土结构表面涂层技术研究与阻锈剂示范工程 [R]. 广州: 中交四航工程研究院有限公司, 2010

[12] 黄君哲, 周欲晓, 王胜年等. 海工混凝土结构表面涂层暴露实验及应用效果 [J]. 中国港湾建设, 2002, (6): 17

[13] 杨海成, 范志宏, 董桂宏等. 长期海洋暴露条件下混凝土耐久性研究 [R]. 广州: 中交四航工程研究院有限公司, 2011

[14] 杨海成, 徐振山, 田雨等. 我国北方海洋环境下混凝土结构表面涂层暴露试验研究 [J]. 中国港湾建设, 2014, (11): 34

[15] 杨海成, 熊建波, 范志宏. 硅烷防护对混凝土抗氯离子渗透性的影响 [J]. 水运工程, 2013, (8): 63

[16] 杨海成, 熊建波, 王胜年. 透水模板布对海工高性能混凝土抗氯离子渗透性的影响 [J]. 中国港湾建设, 2014, (2): 17

[17] 许敏钟, 田正宏, 刘兆磊等. 透水模板布对混凝土抗渗性能影响分析 [J]. 混凝土, 2009, (9): 43

[18] Life-365 Consortium II. Life-365 Service Life Prediction Model and Computer Program for Predicting the Service Life and Life-Cycle Costs of Reinforced Concrete Exposed to Chlorides [M]. Washington DC: SFA, 2008

[19] SY/T 0042-2002. 防腐蚀工程经济计算方法标准 [S]. 2002

